

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ

Хорольский А.А., Гринев В.Г.

*Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины, Днепр,
Украина, khrolskiyaa@ukr.net*

Проектирование производства достаточно трудоемкий и специфический процесс, который сопряжен с экономическими, организационными, технологическими, ресурсными факторами. Совокупность приведенных параметров определяет конечную эффективность производственного процесса, который выражается объемами продукции и ее себестоимостью. При этом поиск взаимосвязей в технологических цепочках оборудования – повторяющийся этап на всех стадиях функционирования предприятия, следовательно, можно применить методы динамического программирования для выбора оборудования, организации транспортных цепочек и т. д. Немаловажно и то, что в условиях рыночной экономики собственник предприятия ориентируется не только на типы оборудования с наибольшей производительностью, но и на цену, себестоимость, трудоемкость выполнения операций, т.е. существует проблема ограниченности ресурсов.

Общее условие задачи проектирования горного производства при ограниченных ресурсах можно сформулировать следующим образом – необходимо найти совокупность средств механизации («предметов») с максимальными качественными характеристиками («ценой») в условиях ограниченных ресурсов («вместимость»). Это подразумевает несколько этапов:

- 1) проверка на наличие указанного типа оборудования («предмета») в технологической цепочке;
- 2) отслеживание за состоянием ресурсов («вместимостью»);
- 3) оценка качественных характеристик («ее ценности») всей цепочки.

Мы должны найти решение, которое заключается в одновременном выполнении трех отдельных этапов. Описанная проблема относится к классу NP – полных задач и для нее нет полиномиального алгоритма, который может решить ее за разумное время, поэтому стоит сделать выбор между точными и приближенными решениями.

Несмотря на большие временные затраты точные методы решения в условиях ограниченных ресурсов, по мнению авторов, более предпочтительны. К точным методам относятся полный перебор, метод ветвей и границ, а также динамическое программирование. Однако, временная сложность полного перебора составляет 2^N , что позволяет применять описанный подход лишь для малого количества альтернатив [1], аналогичная ситуация и с методом ветвей и границ, т.к. по сути мы исключаем заведомо неблагоприятные альтернативы, а в дальнейшем используем полный перебор.

Поэтому, при решении задач горного производства методы динамического программирования будут все чаще использоваться, прежде всего, это обуславливается универсальностью и достоверностью полученных результатов.

Класс задач, которые решаются при использовании методов динамического программирования, достаточно универсален. Наиболее полный перечень приведен в работах Р. Беллмана [2, 3]. Аспектам применения описанных подходов в горнодобывающей отрасли посвящены работы В.Г. Гринева [4, 5], В.Н. Кухарева [6], В.И. Салли [7]. В работах [8, 9] проанализирован заграничный опыт использования методов динамического программирования в горном производстве.

Рассмотрим конкретную задачу, которая заключается в выборе средств механизации очистного забоя угольной шахты. Технологическая цепочка состоит из механизированной крепи, очистного комбайна, скребкового конвейера, т.е. совокупности разнородных типов оборудования (предметов), при этом на приобретение запланировано потратить определен-

ную сумму (вместимость). Эту задачу можно решить при помощи динамического программирования. При этом, указанная модель не является новой, а является интерпретацией «задачи о рюкзаке (ранце)» (knapsack problem) [10]. Учитывая, что мы трижды выбираем только один тип оборудования (крепь, комбайн, конвейер) из множества предложенных, то воспользуемся частным решением задачи «рюкзак 0-1» [11].

Для решения задачи обозначим за m максимальную ценность оборудования, т.е. то качество оборудования, которое мы хотим улучшить, а w - сумма, выделенная на приобретение. Тогда, необходимо найти максимальную ценность $m[i, w]$ предметов, полученных из первых i имеющихся предметов, с суммарным весом не превышающим w .

Идея решения заключается в том, что у нас есть объём ресурсов (рюкзак) и на каждом этапе мы анализируем можно ли указанный предмет вместить в заданный объём ресурсов, для этого существуют рекуррентные соотношения:

$$m[0, w] = 0, \quad (1)$$

$$m[i, w] = m[i - 1, w], \text{ для } w_i > w, \quad (2)$$

$$m[i, w] = \max(m[i - 1, w], m[i - 1, w_i - w] + v_i), \text{ для } w_i \leq w \quad (3)$$

где, соотношению (1) соответствует начальная ситуация, когда в «рюкзаке» нет предметов, т.е. ни один тип оборудования не выбран, соответственно ценность (качественная характеристика) типа оборудования $m_i = 0$ и ценность всей технологической цепочки $m = 0$, при этом и затраты (вес) на приобретение каждого типа оборудования $v_i = 0$ и всей цепочки, состоящей из i предметов, $w_i = 0$.

Соотношению (2) соответствует ситуация, когда вес (затраты на приобретение) типа оборудования превышают стоимость средств выделенных на приобретение всей технологической цепочки, следовательно i - й предмет не включаем в цепочку, т.к. по сравнению с $i - 1$ предметом затраты на его приобретение превышают лимит средств (вместимость рюкзака). Т.е. в данной ситуации нами выбрано i типов оборудования, например: уже выбрали механизированную крепь и очистной комбайн с максимальным ресурсом и осталось выбрать скребковый конвейер с максимальным ресурсом m_i и ценой v_i , которая не превысит сумму оставшихся средств $w - w_i$.

Соотношению (3) соответствует ситуация, когда затраты на приобретение типа оборудования (вес) v_i позволяют приобрести оборудование с максимальным ресурсом m_i , при этом стоимость (вес) всей технологической цепочки не превышает выделенных ресурсов (вместимости) w . Выбрав механизированную крепь, количество средств на приобретение других типов оборудования сокращается, а ресурс технологической цепочки, наоборот, растёт, т.е. $m[i - 1, w_i - w]$.

В основе приведенных соотношений (1-3) лежит принцип оптимальности Беллмана, который гласит, что каким бы ни было начальное состояние и решение, последующие решения должны составлять оптимальный курс по отношению к состоянию, которое получено в результате первого решения [12]. Т.е. оптимальная стратегия зависит от текущего состояния и цели и не зависит от предыдущих решений.

Процесс решения лежит в двумерной плоскости, где на оси OX откладывается количество типов оборудования, а на оси OY - затраты на приобретение, а линия, которая соединяет точки в системе XU , выражает ресурс технологической цепочки (рис. 1, 2).

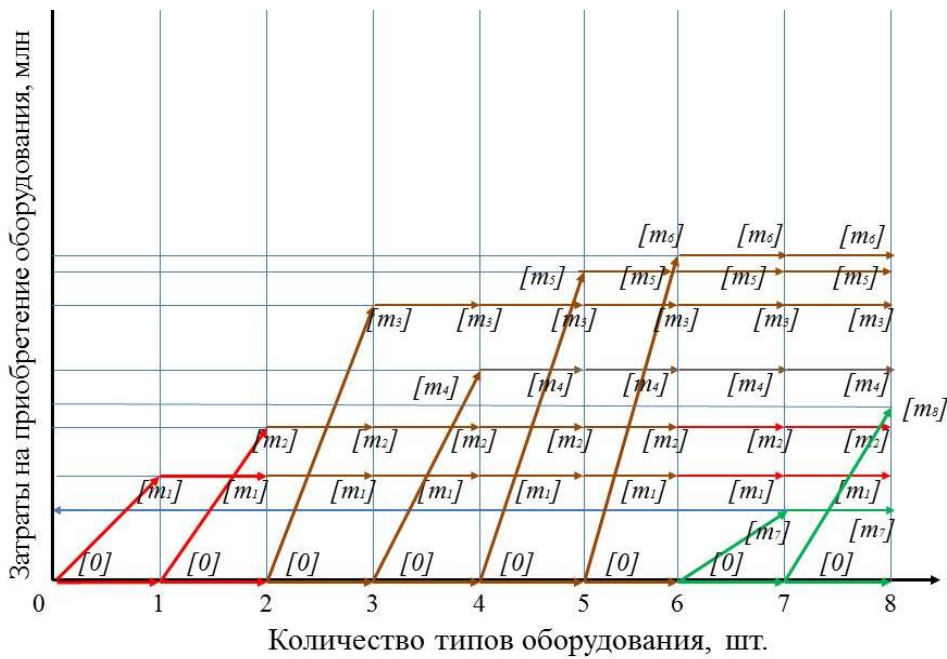


Рисунок 1 – Сетевая модель, которая демонстрирует формирование общего ресурса технологической цепочки и уменьшение средств на приобретение оборудования (этап исследования принадлежности типа оборудования технологической цепочке)

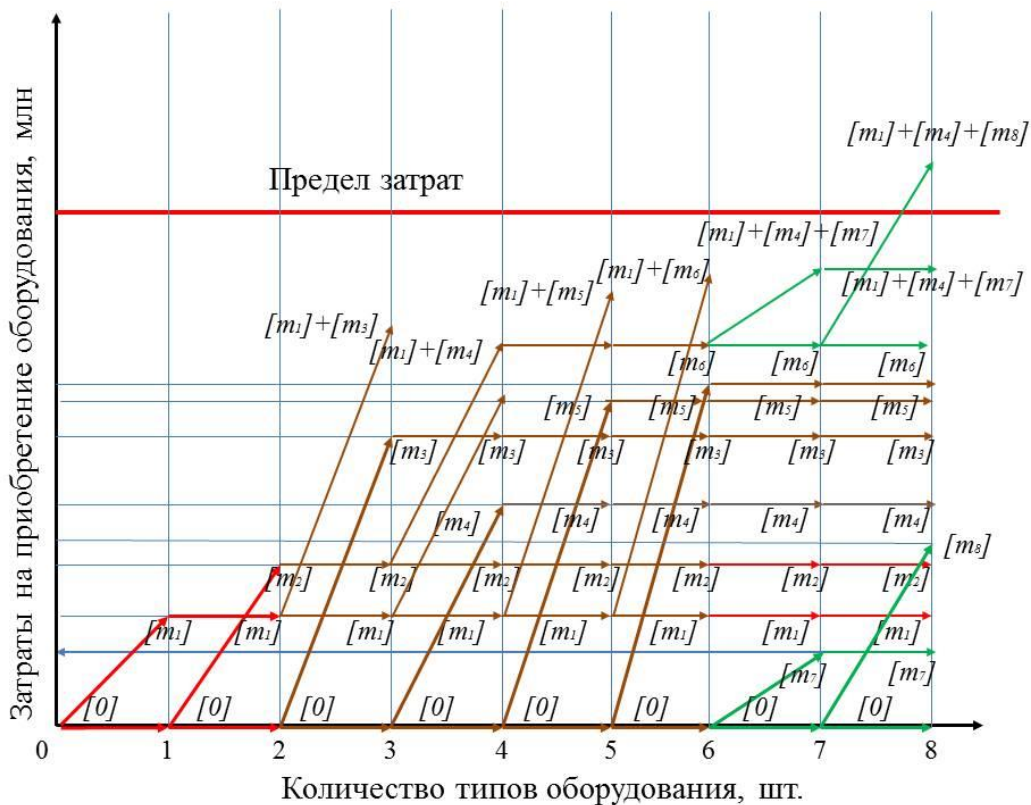


Рисунок 2 – Сетевая модель, которая демонстрирует формирование общего ресурса технологической цепочки и уменьшение средств на приобретение оборудования (после выполнения алгоритмов)

На рис. 2 продемонстрировано результаты решения задачи о выборе оптимальной структуры механизированного комплекса. Всего существует 8 типов оборудования, среди

них 2 типа механизированных крепей с ценностью (ресурсом) m_1, m_2 (линии красного цвета), 4 типа очистных комбайнов с ценностью m_3, m_4, m_5, m_6 (линии темно оранжевого цвета), 2 типа скребковых конвейеров с ценностью m_7, m_8 (линии зеленого цвета). Вес (цена) оборудования $w_1 \dots w_8$ является проекцией на ось ординат. Тогда, необходимо выбрать по одной крепи, комбайну и конвейеру, при этом затраты на их приобретение не должны превышать величины w . Из отношений (1-3) строится сетевая модель. Соотношению (1) соответствует значение $[0]$, т.е. можно указанный тип оборудования не выбрать, следовательно, его ценность (ресурс) будет $[0]$, в противном случае, если выбрали, то ресурс (ценность) будет $m_1 \dots m_8$, а затраты на приобретение – проекция на ось OY . На рис. 1 показана графическая интерпретация рекуррентного соотношения (1).

Далее на каждом этапе выбираем крепь, комбайн и конвейер. При этом, всегда есть стратегия выбора: оставить текущее состояние, т.е. затраты и ресурс не изменятся или перейти к выбору нового оборудования, что влечет увеличение ресурса $[m_1 + m_3]$ и затрат на приобретение w_3 . Сравнив механизированные крепи стоимостью w_1, w_2 из дальнейших расчетов исключаем механизированную крепь 2, т.к. $w_2 > w_1$, следовательно на первом этапе оптимальной ценой будет w_1 , а ресурс цепочки m_1 .

На втором этапе следует выбрать очистной комбайн, для этого необходимо отрезок длиной w_1 , которому соответствует оптимальный тип крепи, соединить с отрезками длиной $w_3 \dots w_6$. В результате затраты на приобретение крепи и комбайна составят $w_3 \dots w_6$, а ресурс $[m_1 + m_3]$, $[m_1 + m_4]$, $[m_1 + m_5]$, $[m_1 + m_6]$. Сравнив $w_3 \dots w_6$ видно, что оптимальной оптимальная цепочка забойного оборудования состоит из крепи 1 и комбайна 4, при этом затраты на приобретение будут w_4 , а ресурс $[m_1 + m_4]$.

Аналогично выберем и конвейер. После построения всей сетевой модели (рис. 2) оптимальной технологической цепочкой будет та, которая состоит из крепи 1, комбайна 4 и конвейера 7, следовательно, цена составит w_7 , а общий ресурс $[m_1 + m_4 + m_7]$. Более того, как видно из рис. 2 полученная альтернатива учитывает возможности производства, в тоже время при ресурсе $[m_1 + m_4 + m_8]$ - средств недостаточно.

Можно также и решать обратные задачи. Рассмотрим процессы в угольной шахте. После проектирования очистного забоя необходимо решить еще одну задачу, которая заключается в транспортировке полезного ископаемого из лавы к бункеру околоствольного двора. Проанализируем такую технологическую схему – добытый уголь поступает на скребковый конвейер, затем с него перегружается на участковый ленточный конвейер и после этого происходит погрузка на уклонный ленточный конвейер. Мы должны спроектировать технологическую цепочку транспорта так, чтобы пропускная способность транспорта была выше производительности в очистном забое, при этом на каждом шагу транспортировочные способности должны возрастать. Это обусловлено тем, что на скребковый конвейер и участковый ленточный поступает уголь только добытый очистным комбайном, а уже на уклонный ленточный конвейер могут поступать дополнительные потоки угля, например, из других очистных забоев.

Применительно к методам динамического программирования задачу можно сформулировать как нахождение минимального числа транспортирующих средств, которые позволят обеспечить необходимую пропускную способность, т.е. как можно быстрее «достичь» заданного максимума при минимуме перестановок. Для этого обозначим транспортные способности как $y[i, V]$, где V – суммарная ценность (заданная пропускная способность технологической цепочки) первых i предметов (транспортирующих устройств). Тогда, решение можно описать рекуррентными соотношениями [13]:

$$\begin{aligned} y[0,0] &= 0; \\ y[0,V] &= W + 1 \end{aligned} \tag{4}$$

$$y[i, V] = y[i - 1, V], \text{ для } V < v_i \quad (5)$$

$$y[i, V] = \min(y[i - 1, V], y[i - 1, V - v_i] + w_i), \text{ для } V \geq v_i \quad (6)$$

Аналогично задаче о комплектации очистного забоя оборудованием, решение соотношений (4-6) также можно графически интерпретировать (рис. 3).

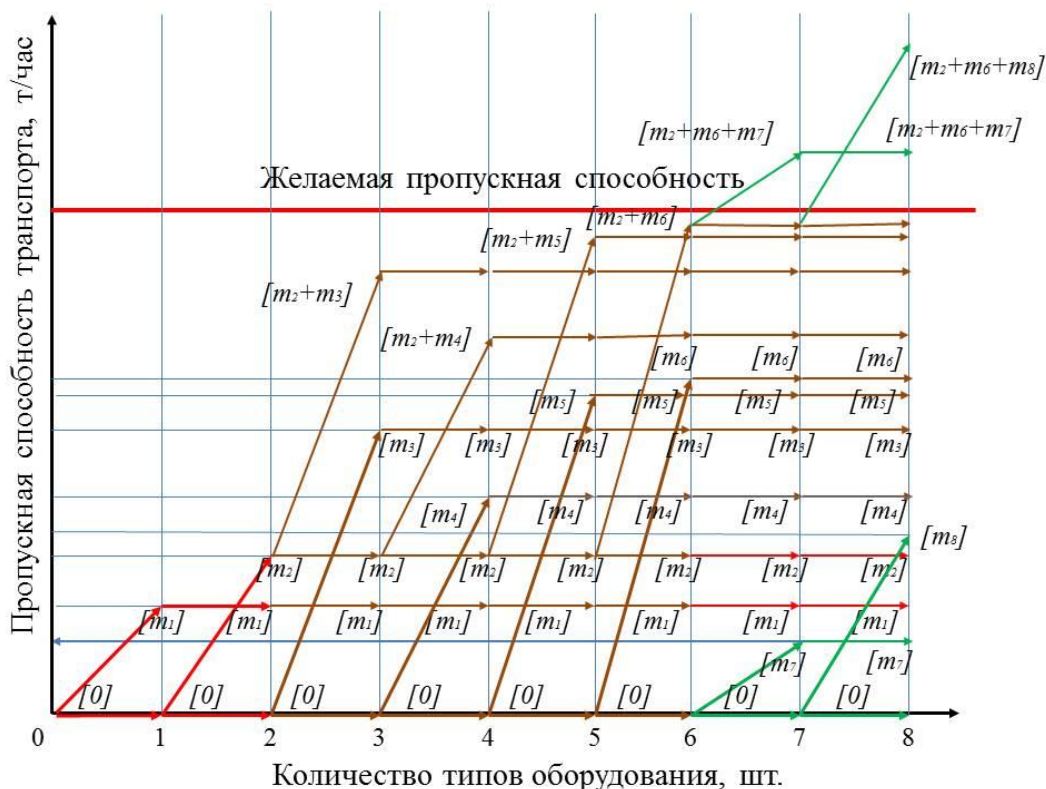


Рисунок 3 – Сетевая модель, которая демонстрирует формирование общего транспортного потока (после выполнения алгоритмов)

Процесс формирования транспортной цепочки состоит в анализе альтернатив. На первом этапе выбираем забойный скребковый конвейер с максимальной производительностью из двух возможных, в нашем случае это конвейер 2 (с характеристикой $[m_2]$). Затем стоит перейти к поиску оптимального забойного ленточного конвейера, т.е. выбрать из $[m_3 \dots m_6]$. Для этого сравним пути $[m_2 + m_3]$, $[m_2 + m_4]$, $[m_2 + m_5]$, $[m_2 + m_6]$, как видно из рис. 3 наибольшая пропускная способность будет у цепочки состоящей из конвейера 2 и ленточного забойного конвейера 6, т.е. $[m_2 + m_6]$. После этого выберем уклонный конвейер. Так как использование конвейера 7 позволяет быстрее достичь заданной транспортной способности, то рациональной будет цепочка из скребкового конвейера 2, забойного ленточного 6 и уклонного 7, т.е. $[m_2 + m_6 + m_7]$. Можно сделать предположение, что у этой цепочки наибольшая пропускная способность, однако это не всегда верно, это объясняется тем, что на стадии анализа 8 типов оборудования на 7 типе (предмете) была достигнута желаемая цель, следовательно алгоритм выполнен. Это видно из соотношений (1-3) и (4-6), т.е. достигаем оптимума среди первых i предметов. Действительно, из рис. 3 видно, что пропускная цепочка, состоящая из конвейеров 2, 6, 8 больше чем у 2, 6, 7, т.е. $[m_2 + m_6 + m_8] > [m_2 + m_6 + m_7]$.

Описанная ситуация демонстрирует возможности методов динамического программирования – можно достигать оптимума, как от первого этапа к конечному (прямая прогонка) так и от конечного к первому (обратная прогонка). Мы рассматривали методы прямой прогонки, т.е. считаем, что производительность в очистном забое не ограничивается неблаго-

приятными условиями и нам необходимо как можно больше добыть угля, следовательно, к забойному конвейеру повышенные требования (максимальная теоретическая пропускная способность). При обратной прогонке ситуация противоположная, т.е. в очистном забое существуют ограничивающие производительность факторы, зато на уклонный конвейер поступают дополнительные потоки угля из других очистных забоев.

В приведенной работе рассмотрено две задачи, которые могут быть решены с использованием методов динамического программирования, при этом каждая из задач соответствует стратегии «модели» развития производства. В первом случае дано ограниченное число ресурсов и необходимо укомплектовать очистной забой так, чтобы затраты на приобретение не превышали суммы выделенных средств. Во втором случае необходимо ориентироваться на воспроизведение необходимых транспортных потребностей, т.е. как можно скорее достичь максимума. Стоит отметить, что в зависимости от порядка этапов (методов прогонки) результаты будут различаться, это позволяет проектировщику самостоятельно формировать сценарий развития производства [14].

Было упомянуто, что сам процесс динамического программирования основан на анализе стратегий, возможных вариантов развития производства, поэтому стоит остановиться на методах, которых позволяют сформировать базы проектных решений. К ним можно отнести методы дискретной математики – сетевые модели и графы. Прежде всего, это обусловлено наглядностью и информативностью. Для решения задачи о комплектации очистных забоев необходимо иметь представление о наборе альтернатив, их количестве, условиях эксплуатации, фактических показателях производительности, а также реальных взаимосвязях между типами очистного оборудования. Идея заключается в том, что описанные характеристики можно представить универсальным графом, т.е. упорядоченной структурой, в качестве вершин принимаем параметры, а в качестве расстояний между вершинами значения этих параметров (рис. 4).

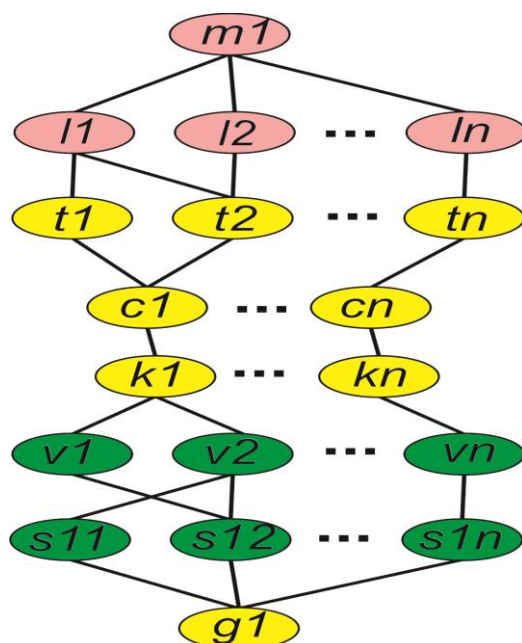


Рисунок 4 – Универсальный граф выбора альтернатив

Фактически универсальный граф (рис. 4) представляет собой совокупность трех моделей: информационной (красный цвет), которая содержит информацию о рациональных условиях эксплуатации; статической оптимизационной (желтый цвет), которая позволяет на начальном этапе проектирования установить типы оборудования с максимальной производительностью и минимальными затратами; оптимизационной динамической (зеленый цвет), которая позволяет решать задачи о снижении себестоимости и максимизации производи-

тельности на протяжении функционирования производства. В данном графе (рис. 4) вершинам будут соответствовать следующие значения технологических параметров: m_1 – мощность пласта, $l_1 \dots l_n$ – длина очистного забоя, $t_1 \dots t_n$ – стоимостные параметры механизированной крепи, $c_1 \dots c_n$ – стоимостные параметры очистных комбайнов, $k_1 \dots k_n$ – стоимостные параметры забойных конвейеров, $v_1 \dots v_n$ – объемы добычи рассматриваемых цепочек; $s_{11} \dots s_{1n}$ – удельная себестоимость; g_1 – рациональная цепочка компонента цепи. Для каждого набора условий эксплуатации существует отдельная модель.

Использование сетевых моделей на стадии проектирования позволяет получить всю необходимую информацию. Практическому применению методов дискретной математики на сетях и графах в горном производстве посвящены работы [15, 16], в работе [17] приведена математическая модель оптимизации процессов с использованием сетевых моделей; применению алгоритмов оптимизации для решения поставленных задач посвящена работа [18], а программной реализации [19, 20]. Описанные подходы также могут быть использованы и в машиностроении и металлургии и энергетике [21, 22]. Одним из преимуществ предложенного инструмента является его наглядность, простота, возможность работать и хранить большие массивы данных. Характерной особенностью инструментов описанных в работе является возможность применения их в совокупности с MCDA методами [23] на любой стадии исследования, а также в качестве дополнения уже к известным способам планирования горных работ [24 – 26].

Рассмотренные в данной работе ситуации и их решение являются интерпретациями уже известных задач динамического программирования, однако, с развитием информационных технологий удастся получить новые алгоритмы приближенных и точных методов вычислений, а также существенно увеличить размерность задач. Проведение аналогий с уже решенными проблемами в динамическом программировании позволяет проектировщику совершить переход от удовлетворения локальных потребностей, которые заключаются в рационализации отдельных параметров, к поиску стратегий и сценариев развития производства, т.е. расширить горизонты планирования.

Список литературы

1. Окулов С.М. Программирование в алгоритмах / С. М. Окулов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2002. – 341 с.
2. Беллман Р., Гликсберг И., Гросс О. Некоторые вопросы математической теории процессов управления. – Пер. с англ. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 339 с.
3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – Пер. с англ. – М.: Наука, 1965. – 462 с.
4. Гринев В.Г., Зубков В.П. Изаксон В.Ю. Шкулев С.П. Решение горных задач на ЭВМ при освоении рудных месторождений: Монография / Новосибирск, Наука, 1999. - 215 с.
5. Амоша А.И., Гринев В.Г., Логвиненко В.И. Комплексное освоение угольных месторождений Донецкой области. – Донецк, 2007. – 216 с.
6. Кухарев В.Н. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении / В.Н. Кухарев, В.И. Салли, А.М. Эрперт. – К.: Выща. шк., 1991. – 304 с.
7. Амоша А.И., Ильяшов М.А., Салли В.И. Системный анализ шахты как объекта инвестирования: Монография – Донецк, Ин-т экономики пром-ти, 2002. – 68 с.
8. Song Zh. Intelligent Scheduling for Underground Mobile Mining Equipment / Zh. Song, M. Rinne, A. van Wageningen // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2013. – Vol. 113. – pp. 889-897.
9. Хорольський, А.О., Грін'юв, В.Г. Закономірності формування технологічних схем для ефективної експлуатації вугільних родовищ. // Форум гірників–2018: матеріали міжнародної науково практичної конференції. – Дніпро, 2018. – С. 43–51.

10. Silvano M., Paolo T. Knapsack problems. – Great Britain: Wiley, 1990. – 306 p.
11. Kellerer, H., Pferschy, U., Pisinger, D. Knapsack Problems – Springer Science+Business Media, 2004. – 548 p.
12. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
13. Скиена, С. Алгоритмы. Руководство по разработке. СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 720 с.
14. Хорольский, А.А., Гринев, В.Г. Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых. Геология и охрана недр. 2018. №3 (68). С. 68–75.
15. Ніколаєв П. П. Вдосконалення технології механізованого видобутку вугілля на основі оцінки рівня взаємозв'язку типів очисного обладнання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.02 «Підземна розробка родовищ корисних копалин» / П. П. Ніколаєв; НАН України, Ін-т фізики гірничих процесів. Донецьк. 2014. 21 с.
16. Хорольский А.А. Выбор комплексов горно-шахтного оборудования на основе теории графов / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // Науковий вісник НТУУ «КПІ». Серія: «Гірництво». 2016. № 31. С.57–64.
17. Сынков В.Г., Гринев, В.Г., Хорольский, А.А. Оценка уровня взаимосвязи очистного оборудования в составе механизированного комплекса. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика, обчислювальна техніка»: зб. наук. праць. ДВНЗ ДонНТУ. – Красноармійськ, 2016. № 22. С. 124–132.
18. Сынков, В.Г., Гринев, В.Г., Хорольский, А.А. Применение базовых алгоритмов оптимизации для выбора очистного оборудования. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика, обчислювальна техніка»: зб. наук. праць. ДВНЗ ДонНТУ. – Красноармійськ, 2016. № 23. С. 115–123.
19. Гринев, В.Г., Хорольский, А.А. Система поддержки принятия решений при разработке месторождений полезных ископаемых. Горно-геологический журнал. 2017. № 3 (51)–№ 4 (52). С.18–24.
20. Хорольский, А.А. Исследование структуры горно-шахтного оборудования с применением графов и сетевых моделей / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Матеріали міжнародної конференції «Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2017» (17–18 квітня 2017 р.). Дніпро : Національний гірничий університет, 2017. – С. 72–82.
21. Hrinov, V.G., Khorolskyi, A.A. Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering. Vol. 60. pp. 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>.
22. Хорольский А.А. Сетевые модели как инструмент повышения организационно технологической надежности производства / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Материалы V Международной научно-практической интернет-конференции «Инновационные технологии в образовании, науке и производстве» (18-19 ноября 2017 г). Минск: Белорусский национальный технический университет. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/36360>.
23. Saaty, T. An innovative orders - of-magnitude approach to AHP-based Mutli-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts / T. Saaty, Shang J. // European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 214(3). – pp. 703-715.
24. Vladyko, O., Kononenko, M., & Khomenko, O. (2012). Imitating modeling stability of mine workings. Geomechanical Processes During Underground Mining, 147-150. <https://doi.org/10.1201/b13157-26>.
25. Khomenko, O., Kononenko, M., & Myronova, I. (2017). Ecological and technological aspects of iron-ore underground mining. Mining Of Mineral Deposits, 11(2), 59-67. <https://doi.org/10.15407/mining11.02.059>.
26. Shi, Q., & Erhan, K. (2016). New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimization problems. Expert Systems with Applications, 43(1), 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.08.044>.